

核融合実験炉における燃料イオン比制御用中性子計測システムの開発

著者	岡田 耕一
号	53
学位授与番号	4094
URL	http://hdl.handle.net/10097/42508

氏 名	おかだ こう いち 岡 田 耕 一		
授 与 学 位	博士 (工学)		
学位授与年月日	平成21年3月25日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 量子エネルギー工学専攻		
学 位 論 文 題 目	核融合実験炉における燃料イオン比制御用中性子計測システムの開発		
指 導 教 員	東北大学教授 笹尾 眞實子		
論 文 審 査 委 員	主査	東北大学教授 笹尾 眞實子	東北大学教授 石井 慶造
		東北大学准教授 北島 純男	東北大学准教授 岩崎 智彦

論文内容要旨

人類は深刻なエネルギー問題に直面しつつある。人口増大や発展途上国の経済発展によりエネルギーの需要は拡大し、有限な資源は消費し続けられている。有限な資源を基礎とする生活は何れ終わりを迎える。人類が豊かな生活を維持するためには、膨大なエネルギー需要を満たすシステムが必要であり、その候補の一つとして核融合技術が存在する。核融合発電システムは現在の発電方式が抱える問題に対する一つの解答である。海水から抽出される重水素資源を用いるため、エネルギー資源の枯渇、資源の偏在は緩和される。原子力システムが抱える問題である高レベル放射性廃棄物の排出は無く、核的暴走、核兵器との関連性は磁場閉じ込め方式を用いる限り原理的にあり得ない。核融合研究は50年以上前から行われていたが、核融合発電実現には依然として、多くの技術的な課題が残されており、当面の間、発電炉に至る事は不可能である。近年、世界初の核融合実験炉である国際熱核融合実験炉 ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) の建設が始まり、核融合研究が発電炉実現に向けた新たな段階に入ったと言える。発電炉を開発するための最初の段階として実験炉が存在し、実験炉の円滑な運用は将来の核融合分野の発展に大きく寄与する。

ITER の燃料プラズマを構成する重水素イオンと三重水素イオンによる DT 核融合反応によって発生する α 粒子は、燃料プラズマ自身を加熱し、核融合反応に必要なイオン温度を維持する。ITER ではプラズマ自身による制御機能を利用するため、燃焼制御に関しては複数の測定結果をフィードバックし、限られた外部制御によって運転が行われる。その限られた制御システムの一つが燃料イオン供給システムである。従って ITER における燃料イオン制御は核融合分野の発展にそのものに影響する重要なシステムであり、必要不可欠な制御システムである。しかし、燃料イオン供給システムに情報をフィードバックさせるシステムの一つである燃料イオン比測定法が現時点で見開発であり、急務な課題となっている。そこで、将来の核融合発電の実現に向け、新たな段階を迎えた核融合分野の発展に寄与する研究の一つとして、本論文では燃料イオン比計測システムを扱った。

ITER において、燃料イオンは重水素イオンと三重水素イオンで構成されているため、ITER では DD 反応、

DT 反応という二種類の核融合反応が起こる。反応確率は DT 反応の方が高く、通常の運転条件において、DD 反応に対して約 100 倍 DT 反応が起こる。DD 反応は二種類の反応があり、ほぼ同確率で分岐するため、中性子の発生率は DT 中性子が DD 中性子の 200 倍となる。燃料イオン比と中性子計測比の間には相関があり、DT 中性子、DD 中性子の計測を同時に行う事が出来れば燃料イオン比を測定する事が可能である。エネルギーの高い DT 中性子が支配的な環境下における燃料イオン比計測システムの開発を行うためには、DD 中性子成分を同定可能な計測位置の選択及び周辺環境の設定と一つのシステムによる DT 中性子、DD 中性子分離計測手法の開発が必要となる。本論文では、上記二つの項目に対する検討を行うと共に、得られた結果を元に ITER における燃料イオン比計測システムの提案を行った。

第 2 章では、ITER における計測位置に入射する中性子スペクトルから DD 中性子成分を同定するための計測位置決定のために必要な知見の導出及び周辺環境の設定について論述した。ITER における燃料イオン比測定用中性子計測システムが担う役割は、燃焼領域中心の燃料イオン比を見積もるための情報を得る事であり、必然的に計測器の設置位置はプラズマ中心視線上となる。従って、計測器の設置箇所はプラズマ中心視線上に設置したコリメータ内部に限定される。ITER では DT 中性子が支配的な環境下にあり、プラズマ周辺の構造材と相互作用を起こす事によってエネルギーを失った中性子や新たに放出される二次中性子がエネルギースペクトル上で DD 中性子のスペクトルを埋もれさせる可能性があり、DD 中性子成分を同定するためには、この散乱減衰成分を低減させなければならない。モンテカルロ計算コード MCNP (Monte Carlo N-Particle transport code system) を用いて ITER を模擬した体系に対する中性子輸送計算を行い、コリメータ内部における中性子のエネルギースペクトルを評価した。ITER を模擬した体系は、ITER を 20 度に分割し、線源は ITER の線源情報を適応した。線源から放出される中性子のエネルギースペクトルはガウス核融合スペクトルとし、想定されるイオン温度、イオン密度の空間分布に従って、放出中性子のエネルギー分解能、発生率に空間分布を与えた。コリメータ径を一定とし、プラズマ中心からの距離を変化させた条件の輸送計算の結果得られたエネルギースペクトルはプラズマ中心から距離が離れるほど DT 中性子の散乱減衰成分が低減し、DD 中性子成分が明らかとなる事が示唆された。また、プラズマ中心からの距離を一定とし、コリメータ径を変えた時の結果からコリメータ径が小さいほど散乱減衰成分が低減される事を示した。これらの結果は計測位置から観測されるプラズマ周辺構造物の割合の減少による構造物が起源となる中性子成分の減少によると考えられる。また、ITER に対してコリメータを設置した場合、コリメータの最後尾には遮蔽材が必要となる。従って、計測位置後方に遮蔽材を設置した事によるバックグラウンド成分への影響を調べるために計測位置後方にコンクリートを設置した体系による中性子輸送計算を行った。結果は計測位置と遮蔽材との距離に近いほど、コリメータ径が大きいほどバックグラウンド成分は増加する事を示し、また、計測位置と遮蔽材の距離が 90 cm 以上では遮蔽材の計測されるエネルギースペクトルに対する顕著な影響は見られない事を示した。さらに、構造材と中性子との相互作用で発生した γ 線は中性子計測のノイズとなり中性子計測の効率を低下せる可能性があるため、 γ 線に対する輸送計算を行い、その影響につい

て評価した。プラズマ中心からの距離を大きくした時の γ 線の減衰率は中性子よりも高く、プラズマ中心から計測位置までの距離を大きくする事で γ 線の影響を低減させる事が出来る事が示された。

第3章では、中性子計測システムの開発について論述した。計測器は求められる性能から、二結晶型 TOF スペクトロメータとした。DT 中性子が支配的な環境下において DD 中性子を効率よく計測するためには、計測器に中性子が入射した際に起こる反応に対し、その確率、放出される粒子の種類、放出角、エネルギーなどについて整理する必要がある。特に、炭素と DT 中性子の相互作用によって起こるブレイクアップ反応で放出される α 粒子に起因したシンチレーション光の発光強度は DD 中性子と水素の弾性散乱で放出される陽子の発光強度と競合する可能性があり、 α 粒子放出に関連した反応の影響の評価が必要であった。性能に影響を与える二次放出中性子のエネルギーや荷電粒子の放出についてまとめ、明らかとなった放出粒子の挙動を元に二結晶型 TOF スペクトロメータの設計について論じ、第2検出器の配置位置に影響を与える散乱角としては45度が最適である事を示した。また、エネルギー分解能やアクシデンタルコインシデンスの低減という観点から検出器の厚さについての検討を行い、本研究では第1検出器の厚さを0.5 cm、第2検出器の厚さを2.0 cmとした。さらに、粒子輸送コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) を用いたシミュレーションにより、想定した反応の妥当性を確認すると共に、実際に二結晶型 TOF スペクトロメータを使用した時、有効なイベントが起こった時の特徴についてまとめた。さらに、炭素と DT 中性子の相互作用に起因した飛行時間スペクトルに対するシミュレーションも行い、実測において想定されるブレイクアップ反応に起因したバックグラウンド成分についての知見を得た。

第4章では開発された燃料イオン比計測用中性子計測システムに対する性能の評価を行った。二結晶型 TOF スペクトロメータの二つの検出器に用いるシンチレータは、複数のシンチレータの性能を比較する事により、第1検出器は BC422Q、第2検出器は BC400 とした。実験は DT 中性子が支配的な環境下において行われ、複数の検出器間距離を設定した体系に対し、DT 中性子と DD 中性子の分離計測を行い、得られた結果の評価を行った。得られた DD 中性子スペクトルはブレイクアップ反応に起因した成分から、実際の DD 中性子成分を見積もった。この時、計測回路系として2種類用意し、それぞれ用いた時の性能の違いについても考察を行った。

第5章では、第4章によって得られた計測器の性能を元に ITER における適用性の評価を行った。要求される性能を達成するためには、入射数の少ない DD 中性子の単位時間あたりの入射数が計数効率に応じた割合で入射する必要があるが、この時、同時に約200倍の DT 中性子が入射する。入射した DT 中性子の一部は第1検出器と反応してシンチレーション光を放出するため、単位時間あたりの入射 DT 中性子の割合次第では、信号(計数)の飽和が起こる。中性子の入射するタイミングがランダムである事から一桁の余裕を想定し、要求を満たす DD 中性子数が得られた時の入射 DT 中性子数を評価した所、計数の飽和が起こる可能性が示唆された。計数の飽和に対する対策として、TOF 球に沿う形で複数の第2検出器を設置する最大計数効率体系を用い、計数効率の向上について検討した。最大計数効率体系における第2検出器の設置は TOF 球に沿う形で想定したため、エネルギー

一分解能も向上し、全中性子スペクトルにおける DD 中性子成分の推定精度も向上した。最後に、計数の飽和に関する制限を上限、要求性能に対する制限を下限として、単位時間あたりの入射 DD 中性子数の範囲を示し、本システムの ITER における設置位置に対する検討を行い、本システムによる燃料イオン比計測が可能となる計測器の設置位置を示した。

以上より、本システムは ITER において中性子計測を用いた燃料イオン比計測の要求を満たすものであり、決定的な手法が未開発であった燃料イオン比測定を可能とするものである。ITER は将来的な核融合発電に向けた重要な装置であり、ITER に対する本システムの寄与が期待される。

論文審査結果の要旨

本論文は国際熱核融合実験炉 ITER の安定した運転を維持するための計測システムの開発に対して論述したものである。世界初の核融合実験炉 ITER では、高い核融合利得の実現、安定した運転の長時間維持、核融合技術の統合及び可能性の実証、構造材の試験、トリチウム増殖ブランケットの試験など核融合に関連したあらゆる分野の技術の実証や試験を行う装置であり、ITER が安定した運転を維持する事は核融合の発展そのものに寄与する。ITER の燃焼制御は様々な計測データのフィードバックを行う事により、燃料イオン供給と外部加熱に集約、統合される。燃料イオン供給システムにフィードバックを行う計測システムの一つである燃料イオン比測定は現在、決定的な手法が開発されておらず急務な課題となっている。本研究では、燃料イオン比測定のための中性子計測システムを開発するものである。燃料イオン比を計測するためには ITER で発生するエネルギーの異なる二種類の中性子をリアルタイムで計測する必要がある。ITER では DD 中性子の約 200 倍の DT 中性子が発生する事が想定されており、また、DT 中性子のエネルギーが DD 中性子のエネルギーの約 6 倍である事から、DT 中性子が支配的な環境下において DD 中性子を高い効率で計測可能なシステムを開発する必要がある。本論文では ITER の体系を模擬したシミュレーション計算を行い、DD 中性子計測を困難とする DT 中性子と周辺構造物の相互作用によって発生する二次放出中性子やガンマ線の低減が可能である事を示し、計測器への入射中性子エネルギースペクトル上において DD 中性子成分が埋もれない計測器の設置条件を示した。高エネルギーの中性子が支配的な環境下において低エネルギーの中性子を計測する事は容易ではなく、計測器及び計測手法の開発が必要不可欠である。要求される性能から計測器を選択し、想定される環境下において起こり得る核反応を評価する事によって計測器の設計の最適化を行った。また、シミュレーション計算によってその性能を評価し、DT 中性子が支配的な環境下において DD 中性子を計測可能な計測器を開発した。開発された計測器を用いて DT 中性子が DD 中性子の約 40 倍発生する環境下において DT 中性子、DD 中性子の分離計測を達成し、本システムにより DT 中性子が支配的な環境下において DD 中性子を計測可能である事を実証した。実際の ITER では、DT 中性子が DD 中性子に対して約 200 倍発生するため、本システムの ITER への適用性の評価及び、より高い効率の向上のための設計を示し、シミュレーション計算によって改良されたシステムが ITER において要求を達成する事が可能である事を示した。最後に、改良されたシステムの性能及び入射中性子の評価から、燃料イオン比計測が可能となる計測器の設置位置を示した。本論文はこれらの研究成果をまとめたものであり、全編 6 章からなる。

第 1 章は序論であり、本研究の背景、目的及び構成を述べている。

第 2 章では、ITER の体系を模擬したシミュレーション計算による計測器の配置条件の検討について論述している。これは中性子計測を用いた燃料イオン比計測の可能性を示す重大な成果であり、ITER への適用性を評価するためには必要な知見である。

第 3 章では、計測器に要求される性能、想定される核反応の評価、計測器設計の最適化、シミュレーション計算による性能の評価を行い、計測器の開発について論述している。これは ITER での燃料イオン比計測において必要不可欠な性能である DT 中性子が支配的な環境下における DD 中性子の高効率計測を可能とする計測器の開発であり、重要な成果である。

第 4 章では、開発された計測器を用い、核融合中性子源施設において行われた DT 中性子、DD 中性子分離計測実験について論述している。最適化された計測回路系を用いて DT 中性子が支配的な環境下における DT 中性子、DD 中性子の分離計測を達成しており、重要な成果である。

第 5 章では、ITER に本システムを設置した際の適応性の評価について論述している。これは ITER 用に最適化された計測器の性能評価及び ITER における計測器の設置位置を示しており、本研究の成果が ITER における中性子計測を用いた燃料イオン比測定を実現可能である事を示す重要な成果である。

第 6 章は結論である。

以上、本論文は核融合発電を達成するために必要な段階である ITER の燃焼制御において、急務な課題となっている燃料イオン比計測を可能とする中性子計測システム開発について述べたものであり、量子エネルギー工学及び核融合プラズマ物理の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。